Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 37, No. 3, Jul.-Agu. 2023, p. 473-486

Analysis of Different Types of Droughts and Their Characteristics in Iran Using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

N. Torabinezhad[1]- A. Zarrin[2]*- A.A. Dadashi-Roudbari[3]

Received: 23-02-2023 Revised: 09-05-2023 Accepted: 10-05-2023 Available Online: 10-05-2023	**How to cite this article:** Torabinezhad, N., Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A.A. (2023). Analysis of different types of droughts and their characteristics in Iran using the standardized evapotranspiration-precipitation index (SPEI). *Journal of Water and Soil, 37*(3), 473-486. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81322.1257

Introduction

Drought is a costly natural hazard with wide-ranging consequences for agriculture, ecosystems, and water resources. The purpose of this research is to determine the characteristics of drought and its types in Iran during the last four decades. Drought turns into different types in the water cycle and imposes many negative consequences on natural ecosystems and different socio-economic sectors. According to International Disaster Database (EM-DAT), drought accounts for 59% of the economic losses caused by climate change. Many parts of the world have experienced extensive and severe droughts in recent decades. In Iran, droughts have occurred frequently during the last four decades and have become more severe in the last decade.

Materials and Methods

In this research, we used precipitation, temperature, wind speed, and sunshine hours of 49 synoptic meteorological stations during 1981-2020. Drought has been investigated with The Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) in four scales of 3, 6, 12, and 24 months, which represent meteorological, agricultural, hydrological, and socio-economic droughts. To calculate the SPEI, the precipitation variable (P) is analyzed with the cumulative difference between P and potential evapotranspiration (PET). In other words, surplus/deficit climate water balance (CWB) is considered. The FAO Penman-Monteith method was used to calculate PET. Then, using the RUN theory, the characteristics of drought, including its magnitude, duration, intensity, and frequency, were determined for all four investigated scales.

Results and Discussion

The results showed that the frequency of drought events fluctuates from a minimum of 12.13% to a maximum of 18.13% in different regions of the country during 1981-2020. The climatological study of drought characteristics shows that the most frequent drought events occurred in the west, southwest, and southern coasts of the Persian Gulf and northwest of Iran compare to other regions of the country. This is while the duration of the drought period is longer in the eastern and interior regions of Iran. Examining the types of droughts shows that more than 60% of the droughts occurring in Iran are moderate droughts. Moderate and severe droughts are mostly seen in the west, southwest, and northwest of Iran. The duration of Iran's drought varies from at least 3 months in meteorological drought to more than 8 months in socio-economic drought. Therefore, droughts are more frequent in the western regions and longer in the eastern regions. The intensity of drought is also higher in the eastern and interior regions than in the western and northwestern regions of Iran. The decadal changes of drought show that the duration and magnitude of drought in Iran have increased and the severity of the drought has decreased during recent decades.

Conclusion

The intensity, magnitude, and duration of the drought period in Iran increased with the increase of the

1, 2 and 3- M.Sc Student, Associate Professor and Postdoctoral Research Associate of Climatology, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: zarrin@um.ac.ir)
DOI: 10.22067/jsw.2023.81322.1257

investigated scales from 3 months to 24 months. Examining the average frequency of drought showed that as we move from meteorological drought to socio-economic drought, the frequency of drought increases, which confirms the previous findings. The eastern and southeastern parts of Iran have experienced a longer duration and larger magnitude of drought than the western and northwestern Iran, which can be caused by the climate conditions of this region, i.e., high temperature and evapotranspiration and less precipitation, and seasonality.

The maximum magnitude of drought in Iran is related to socio-economic drought (SPEI-24) followed by hydrological drought (SPEI-12). This characteristic has increased especially in the last two decades (2001-2020) compared to the previous decades (1981-2000). This is while the magnitude of meteorological (SPEI-3) and agricultural (SPEI-12) droughts do not increase much in the last two decades compared to the previous decades.

Anthropogenic activities play a more prominent role in increasing the magnitude of socio-economic (SPEI-24) and hydrological (SPEI-12) droughts than natural forcing. With the construction of many dams and the digging of countless deep wells, as well as changing the direction of rivers, the water cycle has been completely affected by human activities during the last four decades in Iran. Obviously, anthropogenic activities play an important role in increasing the magnitude of hydrological and socio-economic droughts. In contrast, meteorological and agricultural droughts have not shown many changes in Iran.

The results of the decadal average of drought intensity showed that this characteristic of drought in the last decade (2011-2020) has decreased compared to previous decades (1981-2010). On the other hand, as mentioned earlier, the magnitude and duration of drought, especially for hydrological and socio-economic droughts, have increased in the last two decades (2001-2020). Therefore, the reason for the decrease in the severity of the drought has a statistical explanation before it has a climatic reason because the severity of the drought is calculated by dividing the magnitude of the drought by its duration.

Keywords: Characteristics of drought, Drought, Iran, RUN theory, Types of droughts

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۲، ص.۴۸۶-۴۷۳

بررسی انواع خشکسالی و مشخصه‌های آن در ایران با استفاده از شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI)

نسترن ترابی نژاد[1]- آذر زرین[2*]- عباسعلی داداشی رودباری[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰

چکیده

خشکسالی یک مخاطره طبیعی پرهزینه با پیامدهای گسترده بر کشاورزی، اکوسیستم و منابع آب است. هدف از این پژوهش بررسی مشخصه‌های خشکسالی و انواع آن در ایران طی چهار دهه گذشته است. برای این منظور از داده‌های ۴۹ ایستگاه هواشناسی همدید طی دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۸۱ استفاده شده است. خشکسالی با شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI) در چهار مقیاس ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از تئوری Run مشخصه‌های خشکسالی شامل بزرگی، طول دوره، شدت و فراوانی آن برای هر چهار مقیاس مورد بررسی محاسبه شد. نتایج نشان داد که در دوره چهل ساله مورد بررسی فراوانی رخداد خشکسالی از حداقل ۱۲/۱۳ درصد تا حداکثر ۱۸/۱۳ درصد از کل ماه‌ها در مناطق مختلف کشور در نوسان است. بررسی اقلیم‌شناسی مشخصه‌های خشکسالی در پهنه ایران نشان می‌دهد که فراوانی خشکسالی در غرب، جنوب‌غرب، سواحل خلیج فارس و شمال‌غرب ایران بیش‌تر از سایر مناطق کشور است. این در حالی است که طول دوره خشکسالی در مناطق شرقی و مرکزی ایران بالاتر است. بررسی انواع خشکسالی نشان می‌دهد که بیش از ۶۰ درصد از خشکسالی‌های رخ داده در ایران از نوع خشکسالی متوسط است. خشکسالی‌های متوسط و شدید در ایران بیش‌تر در غرب، جنوب‌غرب و شمال‌غرب ایران دیده می‌شوند. طول دوره خشکسالی ایران از حداقل ۳ ماه برای SPEI-3 تا بیش از ۸ ماه برای SPEI-24 در تغییر است. شدت خشکسالی نیز در مناطق شرقی و داخلی بیش‌تر از مناطق غربی و شمال‌غربی ایران است. تغییرات دهه‌ای خشکسالی نیز نشان می‌دهد که طی دهه‌های اخیر طول دوره و بزرگی خشکسالی در ایران افزایش یافته و شدت خشکسالی کاهش داشته است.

واژه‌های کلیدی: انواع خشکسالی، تئوری RUN، خشکسالی، مشخصه‌های خشکسالی، ایران

مقدمه

خشکسالی یکی از شایع‌ترین و زیانبارترین مخاطرات طبیعی است و پیامدهای منفی زیادی را در بخش‌های مختلف از جمله منابع آب (Bachmair *et al.*, 2016)، محیط زیست (Pokhrel *et al.*, 2021) و کشاورزی (Wu *et al.*, 2020) به دنبال دارد. خشکسالی در چرخه آب به انواع مختلفی تبدیل می‌شود و بر اکوسیستم‌های طبیعی و بخش‌های مختلف اجتماعی-اقتصادی پیامدهای منفی بسیاری را تحمیل می‌کند (Zhuang et al. 2022). بر اساس آمار پایگاه بین‌المللی بلایای طبیعی (EM-DAT, 2021)، خشکسالی ۵۹ درصد از خسارات اقتصادی ناشی از تغییر اقلیم را به خود اختصاص می‌دهد. بسیاری از نقاط جهان طی دهه‌های اخیر خشکسالی‌های زیادی را تجربه کرده‌اند (Cook *et al.*, 2020). در ایران نیز خشکسالی طی چهار دهه گذشته

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشیار و پژوهشگر پسادکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: Zarrin@um.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.2023.81322.1257

که آمار ایستگاه‌های هواشناسی در دسترس است به دفعات رخ داده و در دهه گذشته فراوانی آن بیش‌تر شده است.

رخداد خشکسالی در یک تعریف ساده و کلی به تغییرات در بی هنجاری‌های هیدرواقلیمی مرتبط است (Heudorfer and Stahl, 2017). در طول رخداد خشکسالی، ویژگی‌های آن همانند زمان‌بندی مراحل مختلف خشکسالی (به عنوان مثال، شروع و پایان)، فراوانی، مدت، شدت و بزرگی انواع مختلف خشکسالی تغییر می‌کند. لذا بررسی صحیح خشکسالی باید دربرگیرنده انواع خشکسالی و مشخصه‌های آن باشد تا بتوان شناختی صحیح نسبت به این پدیده داشت.

برای بررسی انواع خشکسالی و مشخصه‌های آن در مقیاس‌های زمانی–مکانی مختلف، معمولاً از شاخص‌های استاندارد استفاده می‌شود. برای این منظور طی دهه‌های گذشته شاخص‌های مختلفی توسعه داده شده‌اند. از جمله این شاخص‌ها می‌توان به شاخص بارش استاندارد شده (SPI) (McKee *et al.*, 1993)، شاخص بارش تبخیر–تعرق استاندارد شده (SPEI) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010)، شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI) (Palmer, 1965)، شاخص رطوبت خاک استاندارد شده (SSMI) و شاخص خشکسالی چند متغیره (MSDI) (Hao and AghaKouchak, 2013) اشاره کرد. از بین شاخص‌های خشکسالی مختلف، دو شاخص SPI و SPEI به عنوان پرکاربردترین شاخص‌های خشکسالی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، شاخص SPEI نسبت به شاخص SPI پاسخی سریع‌تر و روشن‌تر به تغییرات رطوبتی نشان می‌دهد و در نتیجه در اقلیم‌های خشک و فوق العاده خشک ایران به‌صورت دقیق‌تری خشکسالی را پایش می‌کند (Bazrafshan *et al.*, 2017). بر این اساس در این پژوهش نیز از شاخص خشکسالی SPEI برای مطالعه خشکسالی در ایران استفاده شد.

ایران یکی از کشورهای آسیب‌پذیر در مواجهه با خشکسالی‌هایی با شدت بالا است که خسارات اجتماعی–اقتصادی بزرگی را در چند دهه گذشته متحمل شده است که به‌طور مشخص در نیم قرن گذشته می‌توان به خشکسالی‌های سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۳۷۲، خشکسالی ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۰ و خشکسالی گسترده ۱۴۰۰ اشاره کرد. بنابراین، شناخت مشخصه‌های خشکسالی برای ارائه راهبردهای سازگاری با خطرات خشکسالی ضروری است. تغییرات خشکسالی در توالی‌های مختلف زمانی منجر به پاسخ متفاوت سامانه اقلیم به خشکسالی می‌شود. بنابراین لازم است تا مقیاس‌های مختلف زمانی خشکسالی در کشور مورد بررسی قرار گیرد. مقیاس زمانی خشکسالی تعیین می‌کند که چه نوع خشکسالی مورد محاسبه قرار می‌گیرد. بر اساس استاندارد ارائه شده از سوی سازمان جهانی هواشناسی (WMO)، دوره‌های زمانی ۱ و ۳ ماهه خشکسالی هواشناسی یا کوتاه مدت، دوره ۶ ماهه خشکسالی کشاورزی و دوره ۱۲ ماهه و بیش‌تر خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و یا بلند مدت را برآورد می‌کنند (Svoboda *et al.*, 2012). علاوه بر انواع خشکسالی، مشخصه‌های خشکسالی شامل طول دوره، بزرگی، شدت و فراوانی می‌باشند که در درک وضعیت خشکسالی کمک می‌کنند.

خشکسالی با توجه پیامدهای منفی بسیاری که در کشاورزی، منابع آب، محیط زیست، مهاجرت‌های اجباری و سایر بحران‌های اجتماعی–اقتصادی دارد مورد توجه بسیاری در سطح جهانی قرار گرفته است. بررسی پژوهش‌های انجام شده از خشکسالی با تاکید بر مشخصه‌های آن نشان می‌دهد که خشکسالی در سطح جهانی طی سال‌های اخیر افزایش قابل توجهی داشته است (Cook *et al.*, 2020). افزایش تبخیر–تعرق در نتیجه گرمایش جهانی نیز به عنوان یک محرک جدی در افزایش فراوانی خشکسالی در سطح جهانی معرفی شده است (Pour *et al.*, 2020). بررسی‌های مشخصه‌های خشکسالی در سطح منطقه ای نیز افزایش این پدیده را تایید کرده است. به‌طوری که لی و همکاران (Li *et al.*, 2020) افزایش کلی شدت و فراوانی خشکسالی را طی سال‌های ۲۰۱۵–۱۹۹۸ در چین نشان داده‌اند. روند افزایشی مشخصه‌های خشکسالی به ویژه برای فراوانی و طول دوره خشکسالی در سایر مناطق جهان همانند پاکستان (Ullah *et al.*, 2022)، راجستان هند (Mehta and Yadav, 2022)، حوضه رودخانه یانگ تسه چین (Shi *et al.*, 2022)، حوضه رودخانه دجله در کشور ترکیه (Gumus *et al.*, 2023) و کشور چین (Zhao *et al.*, 2023) نیز تایید شده است.

در سال‌های اخیر پژوهشگران مختلفی پدیده خشکسالی در ایران را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج مطالعات (Ghabaei *et al.*, 2016; Bazrafshan, 2017; Sobhani *et al.*, 2019; Zarei, 2019) حاکی از روند افزایش آن در مناطق مختلف کشور بوده است. پژوهش‌هایی همانند مساعدی و همکاران (Mosaedi *et al.*, 2017) که مشخصه های خشکسالی را در ایران مورد بررسی قرار داده‌اند نشان داده‌اند که تغییراتی در مشخصه‌های خشکسالی با شاخص RDI و زمان رخداد آن در مقیاس ماهانه و بخصوص ماه‌های فصل بهار مشهود است. میان آبادی و همکاران (Mianabadi *et al.*, 2022) خشکسالی های کوتاه مدت (۳، ۶ و ۹ ماهه) و بلندمدت (۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه) را با شاخص SPI در جنوب شرق ایران با استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ای CHIRPS مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد طی سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ خشکسالی‌های کوتاه‌مدت (SPI-3، SPI-6 و SPI-9) با شدت کمتر کوتاه‌تر شده‌اند. در یک مطالعه دیگر اصفهانی و همکاران (Isfahani *et al.*, 2022) نیز با بررسی مشخصه‌های خشکسالی در ایران با شاخص خشکسالی استاندارد چند متغیره (MSDI) نشان دادند که در مناطق جنوبی، جنوب شرقی، شمال شرق و برخی از مناطق غربی کشور طول دوره و بزرگی خشکسالی بیشینه است. برخی دیگر از پژوهش‌ها همچون کاظم زاده و همکاران (Kazemzadeh *et al.*, 2022) به دلیل کمبود ایستگاه هواشناسی در ایران با استفاده از داده‌های مختلف ماهواره‌ای به شناسایی رخدادهای خشکسالی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که شدیدترین رخدادهای خشکسالی هواشناسی شناسایی شده توسط شاخص‌های SPI، SPEI و MSPI در سال‌های

۱۹۹۸-۲۰۰۱، ۲۰۰۸-۲۰۰۹، ۲۰۱۰-۲۰۱۲، و ۲۰۱۶-۲۰۱۷ بوده است.

بررسی منابع نشان می‌دهد که علیرغم انجام پژوهش‌های مختلف و پیشرفت‌های زیادی که در دهه‌های اخیر برای توسعه روش‌های بررسی خشکسالی انجام شده است، با این حال مطالعه‌ای که ترکیبی از انواع خشکسالی‌ها و مشخصه‌های آن را بررسی کرده باشد کماکان انجام نشده و یا در یک منطقه جغرافیایی بخصوص از کشور مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس مسئله اصلی این تحقیق بررسی انواع خشکسالی و مشخصه‌های آن در ایران است. برای این منظور ابتدا انواع خشکسالی با استفاده از شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه مورد بررسی قرار گرفته، سپس نوع خشکسالی رخ داده از منظر خشکسالی متوسط، شدید و خیلی شدید مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت مشخصه‌های رخداد خشکسالی (شدت، بزرگی، فراوانی و طول دوره) مطالعه شده است. لذا در این تحقیق بررسی توأمان مشخصه‌های خشکسالی و نوع خشکسالی رخداده برای خشکسالی‌های کوتاه مدت (SPEI-3 و SPEI-6) و بلند مدت (SPEI-12 و SPEI-24) در گستره ایران مورد توجه قرار گرفته است. انتظار می‌رود نتایج این بررسی در مدیریت خشکسالی در مناطق مختلف کشور مورد استفاده قرار گیرد.

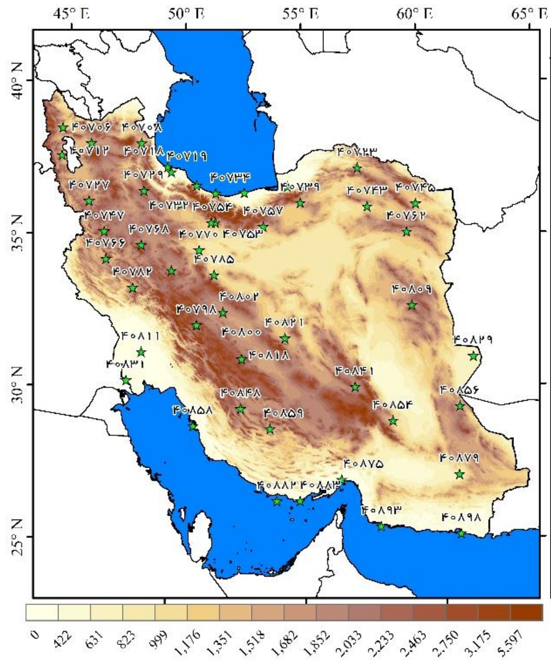
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه تحقیق حاضر کشور ایران است (شکل ۱). ایران کشوری با اقلیم غالب خشک و نیمه خشک است. با این حال، ایران دارای تنوع اقلیمی بسیار زیادی است، به طوری‌که از پهنه‌های بارانی و بسیار مرطوب سواحل جنوبی دریای خزر با بارش نزدیک به ۲۰۰۰ میلی‌متر تا مناطق بسیار خشک داخلی و جنوب‌شرقی با بارش حدود ۱۰۰ میلی‌متر متغیر است. از نظر توپوگرافی می‌توان گفت که ایران کشوری مرتفع است و دو رشته کوه البرز و زاگرس نقش مهمی را در شکل‌گیری اقلیم ایران داشته‌اند.

داده‌های مورد استفاده

داده‌های روزانه بارش، دما، سرعت باد و ساعات آفتابی ایستگاه‌های همدید کشور طی دوره ۱۹۸۱-۲۰۲۰ در تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفته است. کنترل کیفی داده‌ها بر اساس کمترین داده‌های مفقود در سری زمانی برای دوره ۴۰ ساله بررسی شده است. برای این منظور ایستگاه‌هایی که بیش از ۱۰ درصد از کل سری زمانی روزانه آن‌ها (۱۹۸۱-۲۰۲۰) را داده‌های مفقود در بر گرفته است از مجموع داده‌ها حذف شدند.



کد	نام ایستگاه	کد	نام ایستگاه
۴۰۸۳۱	آبادان	۴۰۷۸۲	خرم آباد
۴۰۸۱۸	آباده	۴۰۷۰۳	خوی
۴۰۸۱۱	اهواز	۴۰۸۸۲	جزیره کیش
۴۰۷۶۹	اراک	۴۰۷۴۵	مشهد
۴۰۷۰۸	اردبیل	۴۰۷۵۴	تهران
۴۰۷۳۶	بابلسر	۴۰۷۳۴	نوشهر
۴۰۸۵۴	بم	۴۰۷۱۲	ارومیه
۴۰۸۷۵	بندر عباس	۴۰۷۳۱	قزوین
۴۰۷۱۸	بندر انزلی	۴۰۷۷۰	قم
۴۰۸۸۳	بندر لنگه	۴۰۷۳۲	رامسر
۴۰۸۰۹	بیرجند	۴۰۷۱۹	رشت
۴۰۷۲۳	بجنورد	۴۰۷۴۳	سبزوار
۴۰۸۵۸	فرودگاه بوشهر	۴۰۷۴۷	سنندج
۴۰۸۹۸	چابهار	۴۰۷۲۷	سقز
۴۰۷۵۳	دوشان تپه	۴۰۷۵۷	سمنان
۴۰۸۰۰	اصفهان	۴۰۷۹۸	شهرکرد
۴۰۸۰۲	فرودگاه اصفهان	۴۰۷۳۹	شاهرود
۴۰۸۵۹	فسا	۴۰۸۴۸	شیراز
۴۰۷۳۸	گرگان	۴۰۷۰۶	تبریز
۴۰۷۶۸	فرودگاه همدان	۴۰۷۶۲	تربت حیدریه
۴۰۸۷۹	ایرانشهر	۴۰۸۲۱	یزد
۴۰۸۹۳	جاسک	۴۰۸۲۹	زابل
۴۰۷۸۵	کاشان	۴۰۸۵۶	زاهدان
۴۰۸۴۱	کرمان	۴۰۷۲۹	زنجان
۴۰۷۶۶	کرمانشاه		

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه به همراه ایستگاه‌های همدید مورد استفاده

Figure 1- The location of the study area with the synoptic stations

فقدان آماری بیش از ۱۰ درصد در سری زمانی منتخب برای داده های بارش به دلیل حساسیت روند خطی سری‌های روزانه مناسب نمی- باشد (Zolina *et al*., 2005). بر این اساس ۴۹ ایستگاه همدید که موقعیت آن‌ها در شکل ۱ آمده است مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از داده‌های دمای کمینه، دمای بیشینه، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل با روش پنمن-مانتیث استفاده شد که در ادامه توضیح داده شده است.

شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI)

شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI) برای تعیین کمیت خشکسالی استفاده می‌شود که توسط ویسنت سرانو و همکاران (Vicente-Serrano *et al*., 2010)توسعه داده شده است. برای محاسبه SPEI متغیر بارش (P) با تفاوت انباشته بین P و تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) مورد بررسی قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر یعنی مازاد/کسری توازن آب اقلیمی (CWB) مورد توجه قرار می‌گیرد. برای محاسبه PET از روش پنمن-مانتیث فائو استفاده شده است. روش پنمن-مانتیث به طور جامع متغیرهای تأثیرگذار مختلف را در تبخیر-تعرق نظر می‌گیرد و کاربرد بسیار خوبی در مناطق با شرایط اقلیمی پیچیده دارد (Li *et al*., 2022). روش پنمن-مانتیث با رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$PET_{PM} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (۱)$$

در این رابطه که R_n تابش خالص سطح است، U_2 سرعت باد سطحی (متر/ثانیه) در ارتفاع ۲ متری، Δ شیب منحنی فشار بخار آب اشباع شده-دما و γ گرمای نهان بخار آب است (Li *et al*., 2022).

برای محاسبه شاخص خشکسالی SPEI از بسته آماری با همین نام در محیط R استفاده شده است. بر این اساس از ارائه روابط محاسباتی آن صرفنظر شده است. مقادیر مثبت/منفی SPEI شرایط مرطوب/خشک را نشان می‌دهد. در این مطالعه، مقدار آستانه ۱- برای تشخیص یک رخداد خشکسالی بر اساس تعریف زو و همکاران (Xu *et al*., 2015) استفاده شده است. همانطور که گفته شد از چهار مقیاس زمانی ۳ ماهه، ۶ ماهه، ۱۲ ماهه و ۲۴ ماهه برای بررسی خشکسالی در ایران استفاده شده است. این چهار مقیاس برای توصیف رخدادهای خشکسالی کوتاه مدت تا بلند مدت و یا خشکسالی‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی استفاده می‌شوند (Wang *et al*., 2016).

استخراج مشخصه‌های خشکسالی مبتنی بر تئوری (Run)

بررسی مشخصه‌های خشکسالی (به عنوان مثال، شدت و مدت) و انواع مختلف آن برای توصیف رخداد خشکسالی استفاده می‌شود. انواع خشکسالی در شاخص SPEI در سه دسته خشکسالی متوسط (مقدار شاخص ۱- تا ۱/۴۹-)، خشکسالی شدید (۱/۵- تا ۱/۹۹-) و خشکسالی خیلی شدید (۲- و کمتر) تعریف می‌شوند (Vicente-Serrano *et al*., 2010). برای استخراج مشخصه‌های مختلف خشکسالی از تئوری (RUN) استفاده می‌شود (Yevjevich, 1967). بر اساس این تئوری یک رخداد خشکسالی زمانی شروع می‌شود که یک شاخص خشکسالی (در این تحقیق شاخص SPEI) به زیر آستانه مربوطه (آستانه خشکسالی ۱- است) برسد. زمانی که مقدار شاخص به طور مداوم زیر یک آستانه (یعنی مقدار منفی) باشد آن رخداد خشکسالی ادامه می‌یابد و زمانی که مقدار شاخص بالاتر از سطح آستانه (یعنی مقدار مثبت) باشد خشکسالی پایان می‌یابد. بر این اساس، طول یک رخداد خشکسالی، مدت خشکسالی (رابطه ۲)، مقدار شاخص انباشته شده زیر آستانه مربوطه در طول یک رخداد خشکسالی، بزرگی خشکسالی (رابطه ۳) و میانگین شاخص در یک رخداد خشکسالی، شدت خشکسالی (رابطه ۴) نامیده می‌شود.

$$DD = DTT - DIT \quad (۲)$$

در رابطه ۲، DD مدت زمان رخداد خشکسالی، DTT زمان پایان خشکسالی و DIT زمان شروع خشکسالی است.

$$DS = \sum_i^n SPEI_i \quad (۳)$$

در رابطه ۳، DS بزرگی خشکسالی، $SPEI_i$ مقدار شاخص SPEI و n تعداد کل ماه‌هایی با رخداد خشکسالی است.

$$DI = \frac{DS}{DD} \quad (۴)$$

در رابطه ۴، DI شدت خشکسالی، DS بزرگی خشکسالی و DD طول دوره رخداد خشکسالی است.

به غیر از سه مشخصه اصلی خشکسالی که در روابط ۲ تا ۴ به آن اشاره شد مشخصه چهارمی نیز برای خشکسالی وجود دارد که معمولاً در یک دوره آماری از آن استفاده می‌شود. فراوانی خشکسالی به درصد رخداد خشکسالی اشاره دارد (رابطه ۵).

$$DF = \frac{DE}{N} \times 100 \quad (۵)$$

در این رابطه DF فراوانی رخداد خشکسالی، DE ماه‌هایی با رخداد خشکسالی $(SPEI \leq -1)$ و N تعداد کل ماه‌ها است.

نتایج و بحث

انواع خشکسالی در ایران

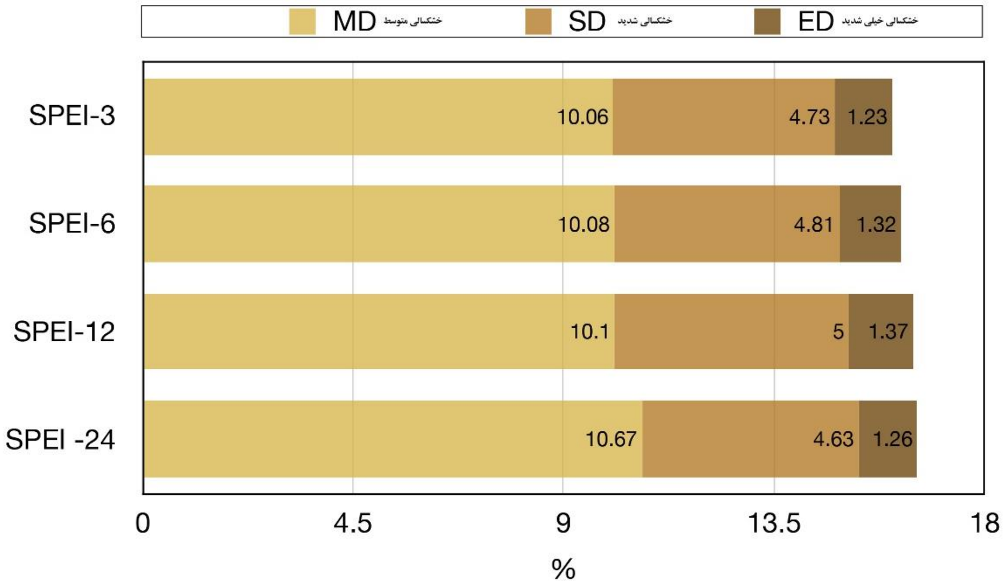
نتایج نشان داد بالاترین درصد رخداد خشکسالی در ایران از نوع خشکسالی متوسط است که شاخص در آن از ۱- تا ۱/۴۹- در تغییر است. در متوسط پهنه‌ای ایران برای هر چهار شاخص SPEI-3، SPEI-6، SPEI-12 و SPEI-24 درصد خشکسالی در مجموع حدود ۱۶ درصد است. خشکسالی‌های خیلی شدید در ایران حداقل ۱/۲۳ درصد

برای شاخص SPEI-3 و حداکثر ۱/۳۷ درصد برای شاخص SPEI-12 در تغییر است. به‌همین ترتیب خشکسالی شدید نیز در متوسط پهنه‌ای کشور بین ۴/۶۳ درصد تا ۵ درصد برای چهار مقیاس زمانی شاخص خشکسالی در نوسان است (شکل ۲). نتایج مربوط به بررسی انواع خشکسالی در ایران نشان داد که درصدهای فراوانی انواع خشکسالی در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه تقریباً یکسان بوده است. علاوه بر این بیشتر خشکسالی‌های رخ داده در ایران طی چهار دهه گذشته از نوع خشکسالی متوسط (کمتر از ۱۰/۷٪) بوده است. پس از آن به ترتیب خشکسالی شدید (کمتر از ۵٪) و سپس خشکسالی خیلی شدید (کمتر از ۱/۵٪) در متوسط پهنه‌ای کشور اتفاق افتاده است.

بررسی انواع خشکسالی در چهار مقیاس مورد بررسی نشان می‌دهد که رخداد خشکسالی در ایران حداقل ۰/۰۸ درصد برای خشکسالی خیلی شدید تا حداکثر ۱۲/۱۷ درصد برای خشکسالی متوسط در تغییر است. خشکسالی‌های متوسط تقریباً در تمامی مناطق ایران بالاتر از ۵ درصد است. به‌عبارتی از ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ حداقل در ۵ درصد از ماه‌های مورد بررسی در کشور خشکسالی متوسط تجربه شده است. مناطقی با بیشینه فراوانی خشکسالی متوسط در هر چهار مقیاس زمانی مورد بررسی SPEI در غرب، شمال‌غرب و شرق ایران دیده می‌شوند. به همین ترتیب برای خشکسالی شدید نیز همین مناطق دارای درصد زیادی از خشکسالی هستند. بالا بودن خشکسالی شدید در مناطق غربی ایران یک تهدید جدی برای سرچشمه رودهای بزرگ همانند کارون، کرخه، دز، زاینده رود و بسیاری دیگر از منابع آبی مهم کشور است. خشکسالی بسیار شدید در ایران، بطور کلی کمتر از ۳ درصد از انواع خشکسالی‌های ایران را در بر می‌گیرد (شکل ۳). با در نظر گرفتن شاخص‌های خشکسالی SPEI-3، SPEI6 و SPEI-12 مناطق شرقی و بخصوص جنوب شرق و مناطق داخلی ایران دارای بیش‌ترین رخداد خشکسالی از نوع بسیار شدید هستند. دمای بالا در این مناطق می‌تواند تقاضای آب در جو و تبخیر–تعرق واقعی را افزایش دهد و منجر به کاهش جریان و در دسترس بودن آب شود که در نتیجه آن خشکسالی های بسیار شدید افزایش خواهد یافت.

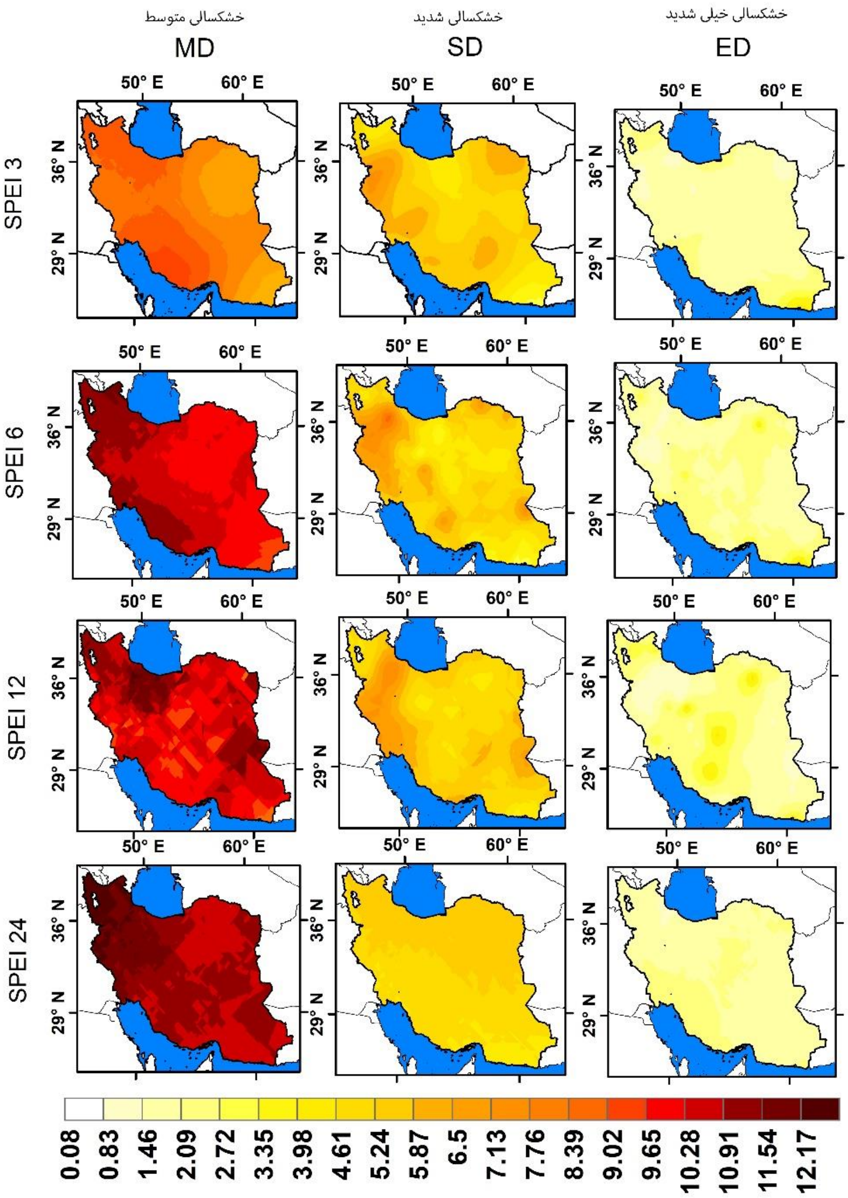
مشخصه‌های خشکسالی در ایران با شاخص SPEI

مشخصه‌های چهارگانه خشکسالی (طول دوره، بزرگی، فراوانی و شدت) در ایران نتایج جالب توجهی را از خشکسالی و وردایی یا همان تغییرپذیری آن برای چهار شاخص خشکسالی SPEI-3، SPEI-6، SPEI-12 و SPEI-24 ارائه می‌دهد. طول دوره خشکسالی با افزایش طول مقیاس زمانی از SPEI-3 تا SPEI-24 افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن هر چهار مقیاس خشکسالی، مناطق شرقی ایران بالاترین طول دوره خشکسالی را در ایران نشان می‌دهند.



شکل ۲- درصد رخداد انواع خشکسالی در متوسط پهنه‌ای ایران؛ MD خشکسالی متوسط؛ SD خشکسالی شدید و ED خشکسالی خیلی شدید

Figure 2- The percentage of occurrence of droughts in the area-averaged of Iran; moderate drought (MD); severe drought (SD), and extreme drought (ED)



شکل ۳- توزیع مکانی انواع خشکسالی در ایران؛ MD خشکسالی متوسط؛ SD خشکسالی شدید و ED خشکسالی خیلی شدید (واحد: درصد)

Figure 3- Spatial distribution of drought types in Iran; moderate drought (MD); severe drought (SD), and extreme drought (ED) (Unit: Percent)

طول دوره خشکسالی در SPEI-3 حداکثر ۴ ماه است که در جنوب شرقی کشور دیده می‌شود. در مقابل کمینه این شاخص در سواحل جنوبی دریای خزر قابل مشاهده است (شکل ۴). خشک سالی‌های بلندمدت (SPEI-12 و SPEI-24) در شرق ایران و مناطق داخلی کشور بیشینه و در مناطق شمال‌غرب و سواحل جنوبی دریای خزر (خزر غربی) کمینه است. به طوری که شاخص SPEI-12 طول دوره ۸/۶۳ ماه را در جنوب‌شرقی ایران نشان می‌دهد. طول دوره خشکسالی برای سواحل جنوبی دریای خزر حدود ۴ ماه است (شکل ۴).

سواحل جنوبی دریای خزر را می‌توان جزو معدود مناطقی در ایران قلمداد کرد که بارش در تمام فصول در آن می‌بارد. اما در سایر مناطق کشور بارش کاملاً تابع فصل است و به‌عبارتی بارش این مناطق فصلی است. فصلی بودن بارش بر گسترش خشکسالی به دلیل وضعیت رطوبتی در اقلیم‌های مختلف تاثیر می‌گذارد. در اقلیم‌های گرم و خشک همانند مناطق داخلی و شرقی ایران که فصول خشک مشخصی دارند، کمبود بارش یا خشکسالی هواشناسی در فصول مرطوب یا بارانی، اگر به همان فصل مرطوب ختم نشود، در تمام فصول خشک بعدی ادامه پیدا می‌کند و می‌تواند منجر به ادامه خشکسالی در چند فصل بعد شود

که در نقشه مربوط به مشخصه طول دوره خشکسالی نشان داده شده است که تا ۸ ماه نیز ادامه دارد (شکل ۴). در چنین شرایطی استفاده بی رویه از آب‌های زیرزمینی در دوره‌های کم بارش (همانند آنچه که در ایران شاهد آن هستیم) خشکسالی هیدرولوژیکی را به شدت تشدید خواهد کرد. علاوه بر کاهش بارش، تقاضای تبخیر جو (Atmospheric Evaporation Demand (AED)) (Peña-Gallardo *et al*., 2019) نیز ارتباط نزدیکی با دما دارد که بر رخداد خشکسالی در مناطق مختلف ایران تأثیر می‌گذارد.

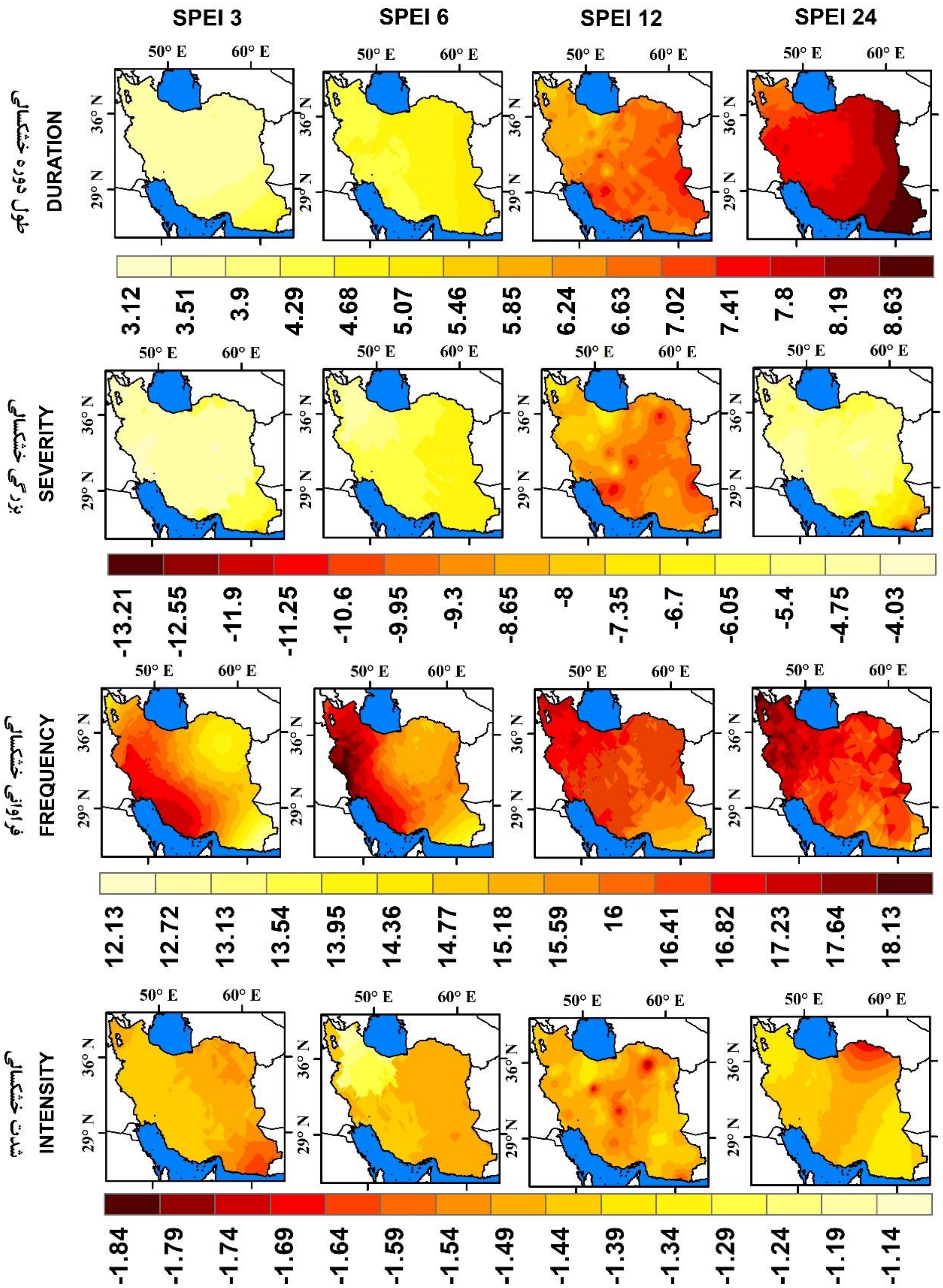
بزرگی خشکسالی نیز از الگویی مشابه با طول دوره خشکسالی پیروی می‌کند، چرا که این مشخصه از خشکسالی مقدار تجمعی شاخص در طول رخداد خشکسالی است. بالاترین بزرگی خشکسالی در ایران در مناطق شرقی و جنوب‌شرقی کشور قابل مشاهده است. بزرگی خشکسالی در ایران حداقل ۴/۰۳- و حداکثر ۱۳/۲۱- است. توزیع مکانی شاخص‌های خشکسالی SPEI-3، SPEI-6 و SPEI-12 تقریباً یکسان است (شکل ۴). اما در خشکسالی بلند مدت (SPEI-24) تفاوت منطقه‌ای زیادی بخصوص در جنوب شرقی ایران دیده می‌شود. بزرگی خشکسالی در مناطق خشک و نیمه خشک بیش‌تر از مناطق مرتفع و مرطوب است. در مناطق خشک و نیمه خشک، بارش نسبتاً کم و نامنظم است که با دوره‌های خشک طولانی در سال همراه است و منجر به ذخیره‌سازی بسیار کم آب می‌شود. بنابراین خشکسالی هیدرولوژیکی به تغییرات طولانی‌مدت بارش پاسخ می‌دهد و همین امر باعث شده است که مشخصه‌های خشکسالی هیدرولوژیکی دارای تغییرات بیش‌تری نسبت به خشکسالی هواشناسی و حتی کشاورزی باشد.

فراوانی خشکسالی در ایران برای همه انواع خشکسالی متوسط، شدید و خیلی شدید بین ۱۲/۱۳ درصد تا ۱۸/۱۳ درصد در تغییر است. همانطور که گفته شد به دلیل افزایش طول دوره خشکسالی از مقیاس ۳ ماهه به ۲۴ ماهه مشخصه‌های خشکسالی نیز افزایش می‌یابند. این نتیجه در توافق با پژوهش‌های پیشین در اروپا (Lloyd-Hughes and Saunders, 2002)، برزیل (Brito *et al*., 2018) و مغولستان (PEI *et al*., 2020) است. این افزایش برای مشخصه فراوانی خشکسالی نیز در ایران قابل مشاهده است. به‌طوری که بین شاخص خشکسالی SPEI-3 و SPEI-24 یک اختلاف ۶ درصدی قابل مشاهده است. به عبارتی با افزایش طول دوره خشکسالی بر فراوانی خشکسالی در ایران ۶ درصد افزوده شده است (شکل ۴). فراوانی دو شاخص خشکسالی SPEI-3 و SPEI-6 از یک الگو پیروی می‌کند، به‌طوریکه در مناطق غربی ایران بخصوص در غرب، جنوب‌غرب، سواحل خلیج فارس و شمال‌غرب کشور که تا سواحل جنوبی دریای خزر نیز کشیده شده است فراوانی خشکسالی بالا است. فراوانی شاخص خشکسالی SPEI-6 در مناطق غربی و شمال‌غربی ایران بسیار زیاد است، به‌طوری که در غرب ایران فراوانی آن به ۱۸ درصد می‌رسد (شکل ۴).

بررسی فراوانی خشکسالی برای دو مقیاس از خشکسالی بلند مدت شامل SPEI-12 و SPEI-24 تغییرات بیش‌تری را به نسبت به دو شاخص پیشین در ایران آشکار می‌سازد. این دو شاخص بیشینه فراوانی خشکسالی را در شمال‌غربی ایران نشان می‌دهند. فراوانی خشکسالی در نوار شرقی ایران نیز الگوی بیشینه را نشان می‌دهد. مقایسه دو مشخصه فراوانی و طول دوره خشکسالی نتیجه جالبی را در ایران نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود طول دوره خشکسالی در مناطق شرقی ایران زیاد است. این نتیجه با یافته‌های پیشین (Isfahani *et al*., 2022) در خصوص مشخصه‌های خشکسالی این منطقه مطابقت دارد. این در حالی است که در مناطق غربی و شمال‌غربی کشور طول دوره خشکسالی کمینه است. اما این نتیجه برای فراوانی خشکسالی در هر چهار مقیاس از خشکسالی مورد بررسی، برعکس طول دوره خشکسالی است. به‌عبارت دیگر می‌توان اذعان داشت که اگر چه در شمال‌غرب و غرب ایران خشکسالی‌ها طول دوره کمتری را نسبت به مناطق شرقی و جنوب‌شرقی و یا حتی مناطق داخلی ایران دارند اما در این مناطق خشکسالی با فراوانی بالاتری اتفاق می‌افتد. لذا مشخصه های خشکسالی‌های ایران از نظر اقلیمی دارای الگوی متفاوتی هستند. به طوری که طول دوره خشکسالی در شرق و جنوب شرق ایران بیش‌تر از سایر مناطق کشور است این در حالی است که فراوانی خشکسالی در غرب و شمال‌غرب ایران که دارای اقلیم سردسیر هستند بیش‌تر از بقیه مناطق کشور است.

در مناطق سردسیر چرخه هیدرولوژیکی به شدت تحت تأثیر فرآیندهای مرتبط با برف قرار دارد. زمان بارش برف و مقدار آن می‌تواند بر شروع، توسعه و تشدید خشکسالی تاثیر بگذارد. به طوری که بارش کم برف و افزایش دما به بالای نقطه انجماد در طول فصل سرد باعث تجمع کم برف یا ذوب سریع آن می‌شود که می‌تواند باعث کاهش جدی جریان آب در سطح حوضه در فصل بهار و به‌طور کلی فصول گرم سال شود که خشکسالی هیدرولوژیکی را به طور جدی تشدید می‌کند.

شدت خشکسالی که از نسبت بزرگی خشکسالی به طول دوره خشکسالی محاسبه می‌شود جنبه‌های دیگری از مشخصه‌های اقلیمی خشکسالی را در ایران آشکار می‌کند. به‌طور کلی شدت خشکسالی در مناطق شرقی و جنوب شرقی ایران در چهار مقیاس مورد بررسی از خشکسالی در ایران بالا است. دو شاخص خشکسالی SPEI-12 و SPEI-24 الگوی متفاوتی نسبت به دو شاخص خشکسالی SPEI-3 و SPEI-6 در ایران دارند. بر اساس نتایج به‌دست آمده شدت خشکسالی هیدرلوژیکی در ایران داخلی، شمال‌شرق و جنوب شرقی کشور بیشینه است.



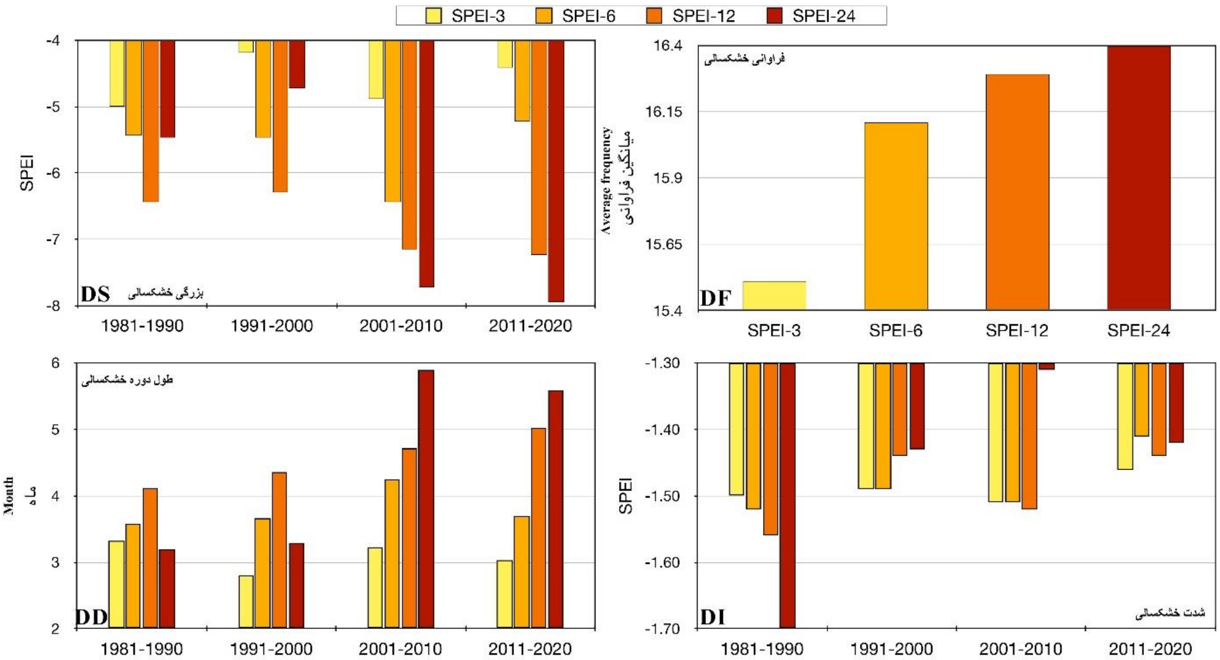
شکل ٤- توزیع مکانی مشخصه‌های خشکسالی در ایران؛ ردیف اول طول دوره خشکسالی، ردیف دوم بزرگی خشکسالی، ردیف سوم فراوانی خشکسالی و ردیف چهارم شدت خشکسالی

Figure 4- Spatial distribution of drought characteristics in Iran; The first row is the duration of the drought, the second row is the severity of the drought, the third row is the frequency of the drought, and the fourth row is the intensity of the drought

همین الگو نیز تا حدودی برای شاخص خشکسالی SPEI-24 در ایران قابل مشاهده است. به طوری که شدت خشکسالی در شمال‌شرق، مناطق داخلی و جنوب شرقی کشور بیش‌تر از مناطق شمال‌غرب و غرب کشور است (شکل ۴).

بررسی مشخصه‌های خشکسالی نشان می‌دهد که خشکسالی هواشناسی معمولاً باعث رخداد خشکسالی کشاورزی و سپس هیدرولوژیکی خواهد شد. اما در بسیاری از موارد خشکسالی هواشناسی مستقیماً باعث خشکسالی کشاورزی یا هیدرولوژیکی نمی‌شود. معمولاً این عوامل ترکیبی هستند که با نقش‌های متفاوت عوامل طبیعی و انسانی بر رخداد خشکسالی تأثیر می‌گذارند. مهمترین عوامل رخداد خشکسالی، شرایط اولیه یا اقلیمی و شرایط حوضه‌های آبریز است. وضعیت اولیه حوضه آبریز منطقه مانند وجود برف، یخچال طبیعی یا سطح آب زیرزمینی نقش مهمی در خشکسالی هیدرولوژیکی ایفا می کند.

وردایی دهه‌ای مشخصه‌های اصلی خشکسالی (بزرگی، طول دوره و شدت) نشان دهنده افزایش بزرگی و طول دوره خشکسالی در ایران است. بزرگی خشکسالی برای هر چهار مقیاس مورد بررسی در دهه آخر نسبت به دهه پیشین روند افزایشی را نشان داده است. همانطور که پیش‌تر نیز گفته شد مقدار مشخصه‌های خشکسالی با افزایش مقیاس زمانی خشکسالی بیش‌تر شده‌اند. مشخصه دیگری از خشکسالی که در طی دهه‌های اخیر روند افزایشی قابل توجهی داشته است، طول دوره خشکسالی است. طول دوره خشکسالی در ایران برای مثال برای شاخص خشکسالی SPEI-12 از ۴ ماه در دهه اول (۱۹۹۰-۱۹۸۱) به ۵ ماه در دهه آخر مورد بررسی (۲۰۲۰-۲۰۱۱) در متوسط پهنه‌ای ایران رسیده است (شکل ۵). در مقابل مشخصه شدت خشکسالی در متوسط پهنه‌ای کشور روند کاهشی را داشته است. این روند کاهشی دلیل آماری دارد چرا که همانطور که گفته شد فراوانی خشکسالی در سال‌های اخیر با بزرگی بیش‌تری در ایران اتفاق افتاده است. در مقابل طول دوره خشکسالی همگام با بزرگی و فراوانی خشکسالی افزایش چشمگیری نداشته است و همین امر باعث شده است تا شدت خشکسالی در ایران کمتر شود. به‌عبارت ساده‌تر به دلیل افزایش فراوانی خشکسالی با بزرگی بیشتر، شدت خشکسالی که از تقسیم بزرگی خشکسالی به طول دوره خشکسالی محاسبه می‌شود، کمتر می‌شود. بررسی فراوانی خشکسالی در متوسط چهار دهه گذشته نشان می‌دهد که با افزایش طول دوره، مشخصه فراوانی نیز افزایش دارد. همانطور که در توضیحات شکل ۲ نیز آمده است فراوانی رخداد خشکسالی در ایران در حدود ۱۶ درصد است.



شکل ۵- متوسط پهنه‌ای مشخصه‌های خشکسالی طی چهار دهه گذشته (۲۰۲۰-۱۹۸۱)؛ بزرگی خشکسالی (DS)، فراوانی خشکسالی (DF)، طول دوره خشکسالی (DD) و شدت خشکسالی (DI)

Figure 5- Area-averaged of drought characteristics over the past four decades (1981-2020); moderate drought (MD); frequency drought (FD); severe drought (SD), and extreme drought (ED)

به‌عبارتی ۷۹ ماه از ۴۸۰ ماه مورد بررسی طی دوره چهل ساله در ایران دارای خشکسالی با انواع مختلف بوده است (شکل ۵). دامنه تغییرات ماه‌های دارای خشکسالی در مقیاس ایستگاه حداقل ۳۰ ماه و حداکثر ۱۱۰ ماه در تغییر است.

نتیجه‌گیری

خشکسالی به طور طبیعی در تمامی اقلیم‌ها و دوره‌های زمانی رخ می‌دهد. این تحقیق از شاخص SPEI به عنوان یک شاخص پرکاربرد در بررسی وضعیت خشکسالی با استفاده از داده‌های ۴۹ ایستگاه هواشناسی همدید استفاده نموده است. شاخص خشکسالی در مقیاس های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه مورد بررسی قرار گرفته و مشخصه‌های آن (شامل شدت، مدت، فراوانی و بزرگی) با استفاده از تئوری RUN محاسبه شده است. نتایج اصلی این تحقیق از اقلیم شناسی مشخصه-های خشکسالی را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

شدت، بزرگی و طول دوره خشکسالی در ایران با افزایش مقیاس زمانی مورد بررسی از ۳ ماهه تا ۲۴ ماهه افزایش دارند.

بررسی میانگین فراوانی خشکسالی در ایران نشان داد با افزایش مقیاس زمانی شاخص شاخص SPEI، فراوانی خشکسالی افزایش می یابد که با یافته‌های پیشین خشکسالی در ایران همخوانی دارد (Nouri and Homaee, 2020).

نتایج مشخصه‌های در ایران نشان داد نیمه شرقی و جنوب شرقی ایران طول دوره و بزرگی خشکسالی بیش‌تری را نسبت به غرب و شمال غربی ایران تجربه کرده است که این امر می‌تواند ناشی از شرایط اقلیمی این منطقه، یعنی بالا بودن دما و تبخیر–تعرق و مقدار کم بارش و فصلی بودن آن در این مناطق باشد.

بیشینه بزرگی خشکسالی در ایران مربوط به شاخص خشکسالی SPEI-24 و پس از آن شاخص خشکسالی SPEI-12 است. این مشخصه بخصوص در دو دهه اخیر (۲۰۲۰–۲۰۰۱) نسبت به دهه‌های قبل (۲۰۰۰–۱۹۸۱) افزایش داشته است. این در حالی است که بزرگی خشکسالی‌های کوتاه مدت (SPEI-3 و SPEI-6) تفاوت افزایشی چندانی در دو دهه اخیر نسبت به دهه‌های قبلی ندارند.

عوامل انسان‌شناختی در افزایش بزرگی خشکسالی‌های بلند مدت (SPEI-12 و SPEI-24) نقش بارزتری نسبت به عوامل طبیعی دارند. بدیهی است عوامل انسان شناختی در افزایش بزرگی خشکسالی‌های بلند مدت نقش مهمی دارند. در مقابل شاخص خشکسالی‌های کوتاه مدت (SPEI-3 و SPEI-6) به نسبت به دو شاخص خشکسالی بلند مدت (شامل SPEI-12 و SPEI-24) تغییرات چندانی را در ایران نشان نداده‌اند.

نتایج میانگین دهه‌ای شدت خشکسالی نشان داد که این مشخصه از خشکسالی در دهه آخر مورد بررسی (۲۰۲۰–۲۰۱۱) نسبت به دهه های پیشین (۲۰۱۰–۱۹۸۱) کمتر شده است. از طرف دیگر، همان طور که پیش‌تر نیز آورده شد، بزرگی خشکسالی و طول دوره خشکسالی، به ویژه در مقیاس‌های بلند مدت (SPEI-12 و SPEI-24)، در دو دهه آخر مورد بررسی (۲۰۲۰–۲۰۰۱) افزایش یافته است. افزایش بزرگی و طول دوره خشکسالی در متوسط پهنه‌ای ایران نتایج مساعدی و همکاران (Mosaedi *et al*., 2017) را تایید می‌کند. لذا علت کاهش شدت خشکسالی پیش از آنکه دلیل اقلیمی داشته باشد توضیح آماری دارد چرا که شدت خشکسالی با تقسیم بزرگی خشکسالی بر طول دوره خشکسالی محاسبه می‌شود.

منابع

1. Bachmair, S., Stahl, K., Collins, K., Hannaford, J., Acreman, M., Svoboda, M., ... & Overton, I. C. (2016). Drought indicators revisited: the need for a wider consideration of environment and society. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, *3*(4), 516-536. http://dx.doi.org/10.1002/wat2.1154
2. Bazrafshan, J. (2017). Effect of air temperature on historical trend of long-term droughts in different climates of Iran. *Water Resources Management*, *31*, 4683-4698. https://doi.org/10.1007/s11269-017-1773-8
3. Brito, S.S.B., Cunha, A.P.M., Cunningham, C.C., Alvalá, R.C., Marengo, J.A., & Carvalho, M.A. (2018). Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology*, *38*(2), 517-529. https://doi.org/10.1002/joc.5225
4. Cook, B.I., Mankin, J.S., Marvel, K., Williams, A.P., Smerdon, J.E., & Anchukaitis, K.J. (2020). Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future*, *8*(6), e2019EF001461. https://doi.org/10.1029/2019EF001461
5. EM-DAT, (2021). The International Disaster Database. (Available at: https://www.emdat.be/index.php)
6. Ghabaei, S.M., Zare Abyaneh, H., Mosaedi, A., & Samadi, S.Z. (2016). Assessment of humidity conditions and trends based on standardized precipitation evapotranspiration index (SEPI) over different climatic regions of Iran. *Water and Soil*, *30*(5), 1700-1717. (In Persian with English abstract). http://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.47565
7. Gumus, V., Dinsever, L.D., & Avsaroglu, Y. (2023). Analysis of drought characteristics and trends during 1965–2020 in the Tigris River basin, Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-17. https://doi.org/10.1007/s00704-023-04363-x

8. Hao, Z., & AghaKouchak, A. (2013). Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model. *Advances in Water Resources*, *57*, 12-18. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.03.009
9. Heudorfer, B., & Stahl, K. (2017). Comparison of different threshold level methods for drought propagation analysis in Germany. *Hydrology Research*, *48*(5), 1311-1326. https://doi.org/10.2166/nh.2016.258
10. Isfahani, P.M., Soltani, S., & Modarres, R. (2022). Assessing agrometeorological drought trends in Iran during 1985–2018. *Theoretical and Applied Climatology*, *150*(1-2), 251-262. https://doi.org/10.1007/s00704-022-04159-5.
11. Kazemzadeh, M., Noori, Z., Alipour, H., Jamali, S., Akbari, J., Ghorbanian, A., & Duan, Z. (2022). Detecting drought events over Iran during 1983–2017 using satellite and ground-based precipitation observations. *Atmospheric Research*, *269*, 106052. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106052.
12. Li, L., She, D., Zheng, H., Lin, P., & Yang, Z.L. (2020). Elucidating diverse drought characteristics from two meteorological drought indices (SPI and SPEI) in China. *Journal of Hydrometeorology*, *21*(7), 1513-1530. https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0290.1
13. Li, Y., Qin, Y., & Rong, P. (2022). Evolution of potential evapotranspiration and its sensitivity to climate change based on the Thornthwaite, Hargreaves, and Penman–Monteith equation in environmental sensitive areas of China. *Atmospheric Research*, *273*, 106178. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106178
14. Lloyd-Hughes, B., & Saunders, M.A. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, *22*(13), 1571-1592. https://doi.org/10.1002/joc.846
15. McKee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, *17*(22), 179-183.
16. Mehta, D., & Yadav, S.M. (2022). Temporal analysis of rainfall and drought characteristics over Jalore District of SW Rajasthan. *Water Practice and Technology*, *17*(1), 254-267. https://doi.org/10.2166/wpt.2021.114
17. Mianabadi, A., Salari, K., & Pourmohamad, Y. (2022). Drought monitoring using the long-term CHIRPS precipitation over Southeastern Iran. *Applied Water Science*, *12*(8), 183. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01705-4
18. Mosaedi, A., Mohammadi Moghaddam, S., & Kavakebi, Gh. (2017). Drought characteristics based on Reconnaissance Drought Index and its variations in different time periods and regions of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, *23*(6), 27-52. (In Persian with English abstract). http://doi.org/10.22069/jwfst.2017.8878.2266
19. Nouri, M., & Homaee, M. (2020). Drought trend, frequency and extremity across a wide range of climates over Iran. *Meteorological Applications*, *27*(2), e1899. https://doi.org/10.1002/met.1899
20. Palmer, W.C. (1965). *Meteorological drought* (Vol. 30). US Department of Commerce, Weather Bureau.
21. Pei, Z., Fang, S., Wang, L., & Yang, W. (2020). Comparative analysis of drought indicated by the SPI and SPEI at various timescales in inner Mongolia, China. *Water*, *12*(7), 1925. https://doi.org/10.3390/w12071925
22. Peña-Gallardo, M., Vicente-Serrano, S.M., Hannaford, J., Lorenzo-Lacruz, J., Svoboda, M., Domínguez-Castro, F., & El Kenawy, A. (2019). Complex influences of meteorological drought time-scales on hydrological droughts in natural basins of the contiguous Unites States. *Journal of Hydrology*, *568*, 611-625. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.026
23. Pokhrel, Y., Felfelani, F., Satoh, Y., Boulange, J., Burek, P., Gädeke, A., & Wada, Y. (2021). Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. *Nature Climate Change*, *11*(3), 226-233. https://doi.org/10.1038/s41558-020-00972-w
24. Pour, S.H., Abd Wahab, A.K., Shahid, S., & Ismail, Z.B. (2020). Changes in reference evapotranspiration and its driving factors in peninsular Malaysia. *Atmospheric Research*, *246*, 105096. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105096
25. Shi, M., Yuan, Z., Shi, X., Li, M., Chen, F., & Li, Y. (2022). Drought assessment of terrestrial ecosystems in the Yangtze River Basin, China. *Journal of Cleaner Production*, *362*, 132234. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132234
26. Sobhani, B., Zengir, V.S., & Kianian, M.K. (2019). Drought monitoring in the Lake Urmia basin in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, *12*, 1-15. https://doi.org/10.1007/s12517-019-4571-1
27. Svoboda, M., Hayes, M., & Wood, D. (2012). Standardized precipitation index: user guide.
28. Ullah, I., Ma, X., Yin, J., Saleem, F., Syed, S., Omer, A., & Arshad, M. (2022). Observed changes in seasonal drought characteristics and their possible potential drivers over Pakistan. *International Journal of Climatology*, *42*(3), 1576-1596. https://doi.org/10.1002/joc.7321
29. Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., & López-Moreno, J.I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, *23*(7), 1696-1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1
30. Wang, L., Yuan, X., Xie, Z., Wu, P., & Li, Y. (2016). Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus. *Scientific Reports*, *6*(1), 30571. https://doi.org/10.1038/srep30571
31. Wu, B., Ma, Z., & Yan, N. (2020). Agricultural drought mitigating indices derived from the changes in drought characteristics. *Remote Sensing of Environment*, *244*, 111813. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111813
32. Xu, K., Yang, D., Yang, H., Li, Z., Qin, Y., & Shen, Y. (2015). Spatio-temporal variation of drought in China during

1961–2012: A climatic perspective. *Journal of Hydrology*, *526*, 253-264. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.047

33. Yevjevich, V.M. (1967). *Objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts, An* (Doctoral dissertation, Colorado State University. Libraries).
34. Zarei, A.R. (2019). Analysis of changes trend in spatial and temporal pattern of drought over south of Iran using standardized precipitation index (SPI). *SN Applied Sciences*, *1*, 1-14. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0498-0
35. Zhao, R., Sun, H., Xing, L., Li, R., & Li, M. (2023). Effects of anthropogenic climate change on the drought characteristics in China: From frequency, duration, intensity, and affected area. *Journal of Hydrology*, *617*, 129008. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.129008
36. Zhuang, X., Hao, Z., Singh, V. P., Zhang, Y., Feng, S., Xu, Y., & Hao, F. (2022). Drought propagation under global warming: Characteristics, approaches, processes, and controlling factors. *Science of The Total Environment* 156021. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156021
37. Zolina, O., Simmer, C., Kapala, A., & Gulev, S. (2005). On the robustness of the estimates of centennial-scale variability in heavy precipitation from station data over Europe. *Geophysical Research Letters*, *32*, 1-5. https://doi.org/10.1029/2005GL023231